



LIMITES DE ESTABILIDADE DE NAVIOS EM ONDAS

M. A. S. Neves

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia Oceânica
Cx. P. 68508 Rio de Janeiro, RJ, Brasil

N. Pérez M.

Instituto de Ciencias Navales Y Maritimas, Universidad Austral de Chile
Casilla 897, Valdivia, Chile

L. Valerio M.

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia Oceânica
Cx. P. 68508 Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Resumo. *A estabilidade do navio em ondas é investigada, considerando os efeitos de acoplamento não lineares das forças de restauração e de ondas. Mostra-se que as instabilidades derivadas desses acoplamentos não lineares existem e que elas podem ocorrer, embora, as forças de segunda ordem que induzem essas instabilidades sejam pequenas. Mapas de estabilidade são obtidos delimitando as regiões de estabilidade para o navio em ondas.*

Palavras-chave: *Estabilidade Dinâmica, Mapas de Estabilidade, Navios Pesqueiros*

1. INTRODUÇÃO

Fenômenos de instabilidade paramétrica em pesqueiros têm sido identificados em forma experimental, Pérez e Sanguinetti (1995). Este tipo de fenômeno não é possível de ser identificado através da teoria linear. Os autores têm apresentado evidências de que ressonância paramétrica é um fenômeno que para alguns cascos de pequeiros pode ser muito intenso. Simulações no tempo obtidas a partir de um modelo matemático abaixo resumido mostraram-se satisfatórias quando comparadas com resultados experimentais. Outra forma de análise da dinâmica de instabilização pelo mecanismo de ressonância paramétrica é por meio de diagramas de limites de estabilidade, os quais, em conjunto com simulações no tempo, permitem um aprofundamento do entendimento do processo. O presente trabalho pretende ser uma contribuição nesse sentido.

2. O MODELO MATEMÁTICO

A instabilidade paramétrica pode ser modelada considerando apenas os efeitos não lineares no momento de restauração e a influência dos efeitos viscosos no amortecimento.

Desta forma, o problema da estabilidade paramétrica do navio em ondas longitudinais pela popa tem sido estudado em forma teórica por vários autores, e. g. Skomedal (1982), Bloki (1980), Neves, Pérez e Sanguinetti (1986,1987a, 1987b, 1988), Neves e Pernambuco (1991), Neves e Salas (1992, 1993), Neves e Valerio (1994, 1995).

Uma formulação básica para a modelação do fenômeno de ressonância paramétrica é apresentada neste trabalho. Os efeitos viscosos, obtidos segundo a formulação de Himeno (1981), foram assumidos como sendo independentes dos efeitos do fluido potencial.

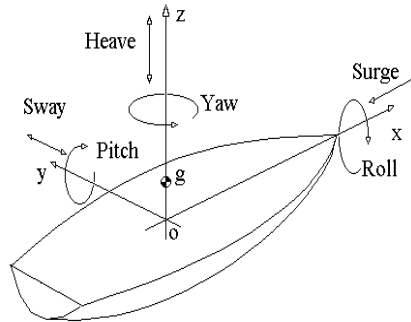


Figura 1 - Sistema de coordenadas

Teoria potencial foi usada para determinar as forças hidrodinâmicas. O potencial de velocidade foi assumido decomposto em várias componentes, incluindo um potencial associado com o sistema de ondas incidentes, um potencial de radiação e um potencial de difração. A determinação das forças de radiação foi feita considerando uma modelação tridimensional baseada no método de elementos de contorno descrito por Inglis e Price (1980).

Os cascos de pesqueiros aqui discutidos são apresentados em detalhe por Neves, Pérez e Valerio (1999). Adiante, serão identificados como casco TS (*transom stern*) e RS (*round stern*).

As expressões para as ações hidrostáticas, válidas para grandes amplitudes de movimento, foram expandidas em séries de Taylor considerando os movimentos de *heave*, *roll* e *pitch*, obtendo-se os coeficientes da serie de Taylor, até segunda ordem. Assim, o modelo utilizado para ondas longitudinais, é dado por:

$$(I_x + A_{44})\ddot{\phi} + D(\dot{\phi}) + M_r(\phi, z, \theta, \zeta) = 0 \quad (1)$$

O momento de restauração de *roll* é assumido como sendo:

$$M_r(z, \phi, \theta, \zeta) = C_{44}\phi + C_{444}\phi^3 + C_{44z}z\phi + C_{44\theta}\theta\phi + C_{44\zeta}\bar{\zeta}\phi \quad (2)$$

onde C_{44} e C_{444} são coeficientes de *roll* devido a *roll*, $\bar{\zeta}$ é a amplitude da onda, e $C_{44z}, C_{44\theta}, C_{44\zeta}$ representam os termos dependentes do tempo das características de restauração do navio devidas aos movimentos de *heave* e *pitch* e à passagem da onda. Para o sistema coordenado definido anteriormente, e de acordo com as derivações apresentadas por Valerio (1994), tem-se:

$$C_{44} = \Delta \overline{GM} \quad (3)$$

$$C_{44z} = -\rho g \left[\frac{1}{2} \int_L b_0^2(x) \frac{dy}{dz} \Big|_{0,x} dx - z_g A_w \right] \quad (4)$$

$$C_{44\theta} = -\rho g \left[\frac{1}{2} \int_L b_o^2(x) \frac{dy}{dz} \Big|_{o,x} x dx - z_g A_w x_f \right] \quad (5)$$

$$C_{44\zeta} = \rho g \delta \cos(\omega t - \varphi) \quad (6)$$

onde as partes em cosseno e seno da amplitude da contribuição da passagem da onda são:

$$\delta_1 = \int_L \left(\frac{1}{2} b_o^2(x) \frac{dy}{dz} \Big|_{o,x} - z_g b_o(x) \right) \cos\left(\frac{\omega^2}{g} x\right) dx \quad e \quad \delta_2 = \int_L \left(\frac{1}{2} b_o^2(x) \frac{dy}{dz} \Big|_{o,x} - z_g b_o(x) \right) \sin\left(\frac{\omega^2}{g} x\right) dx$$

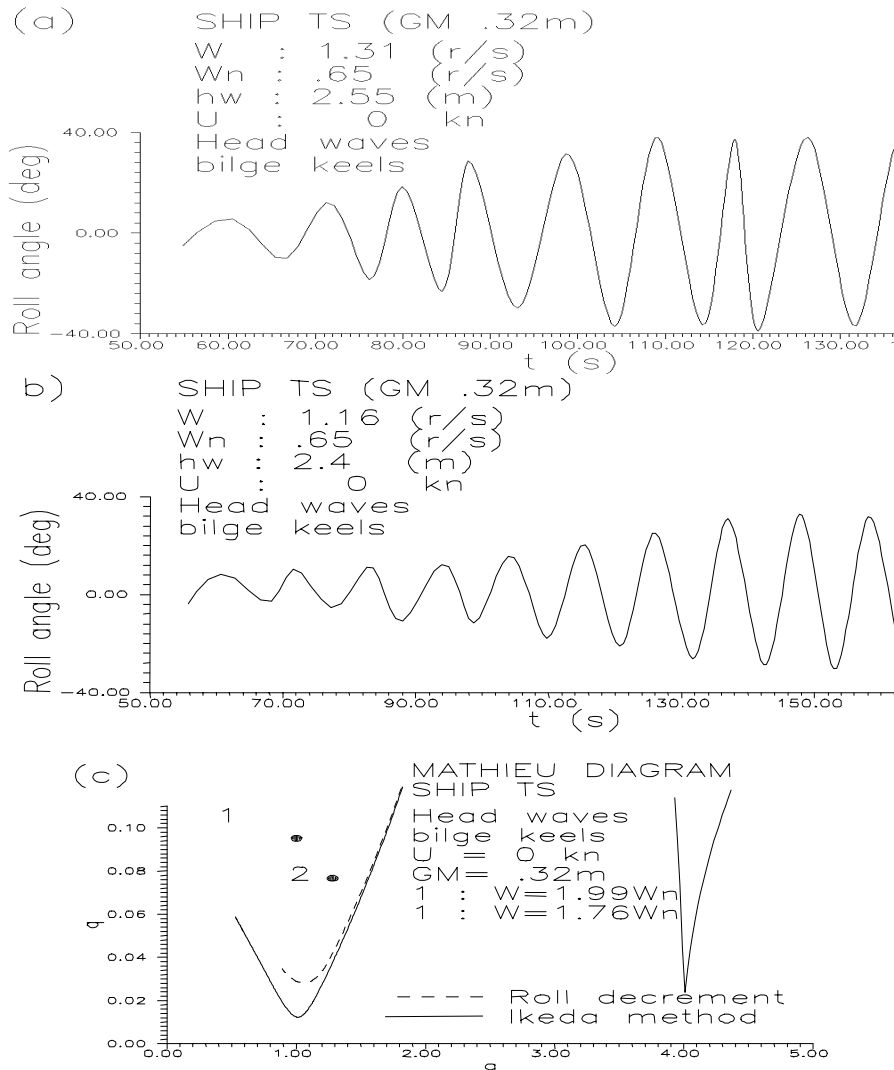


Figura 2 - Casco TS com bolinas, $\overline{GM} = 0.32m$.

Os movimentos de *heave* e *pitch* são obtidos das equações lineares dos movimentos no plano vertical. A variacional linear da equação (1) pode ser expressa na forma de uma *equação de Mathieu amortecida*:

$$x'' + 2u x' + (a + u^2 + 16q \cos 2t)x = 0 \quad (7)$$

Limites de estabilidade correspondendo à equação (7) podem ser determinados e os efeitos do amortecimento e altura metacêntrica nas várias regiões de ressonância paramétrica podem ser avaliados (Valerio, 1994).

3. ANÁLISE DA ESTABILIDADE

Considerando que o modelo matemático descreve muito bem a dinâmica envolvida no processo de instabilização paramétrica de um navio, as Fig. 2 a 7 foram preparadas com o propósito de ajudar na interpretação dos resultados. Em cada uma dessas figuras, gráficos (a) e

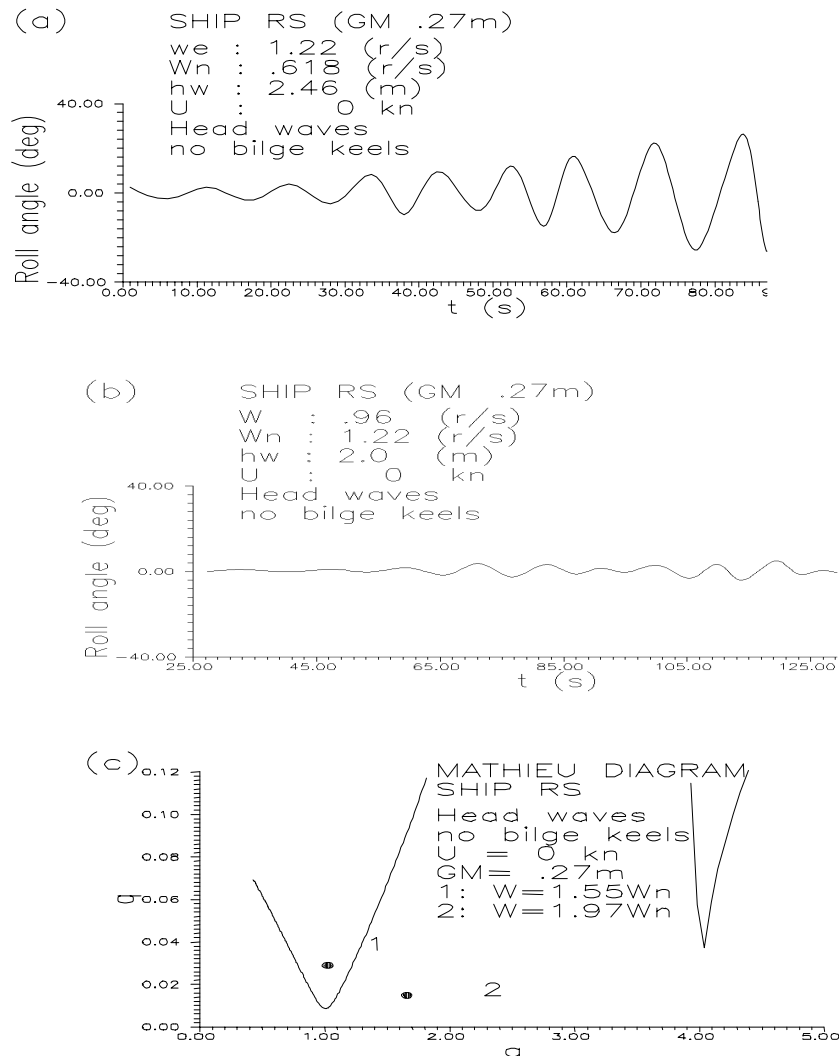


Figura 3 - Casco RS sem bolinas, $\overline{GM} = 0.27m$.

(b) apresentam as séries temporais obtidas em tanque de provas, e gráficos (c) mostram os pontos correspondentes da condição, plotados no diagrama de Mathieu.

A Fig. 2(a) mostra um caso de forte instabilidade para o casco TS com bolinas, na faixa $= 2W_n$, com $\overline{GM} = 0.32m$. Em menos de seis ciclos o ângulo de *roll* alcança aproximadamente 40° . Uma condição muito perigosa, significando um real risco de emborcamento. Para o casco RS atingir tal instabilização intensa, foi necessário reduzir a altura metacêntrica para $\overline{GM} = 0.27m$ e remover as bolinas. Ainda assim, as instabilidades resultantes requereram mais de 8 ciclos para alcançar ângulos de *roll* da ordem de 28 graus.

Esse resultado está dado na Fig. 3(a), e demonstra que o casco TS é muito mais instável em ondas longitudinais que o casco RS. Pontos correspondentes às Fig. 2(a,b) estão plotados na Fig. 2(c), e observa-se que estão muito internos na região definida pelos limites de estabilidade. Na Fig. 2(c) limites de estabilidade são dados também para o amortecimento de *roll* obtido por procedimentos experimentais (*roll decrement tests*) e o método de Ikeda (Himeno (1988), na região de $\omega = 2 \omega_n$. Pequenas diferenças são encontradas quando os procedimentos distintos são aplicados.

As Fig. 3(a,b) mostram uma comparação de uma condição de sintonia com outra sem sintonia. Fica bem claro que sem uma sintonia adequada, os movimentos de *roll* em ondas

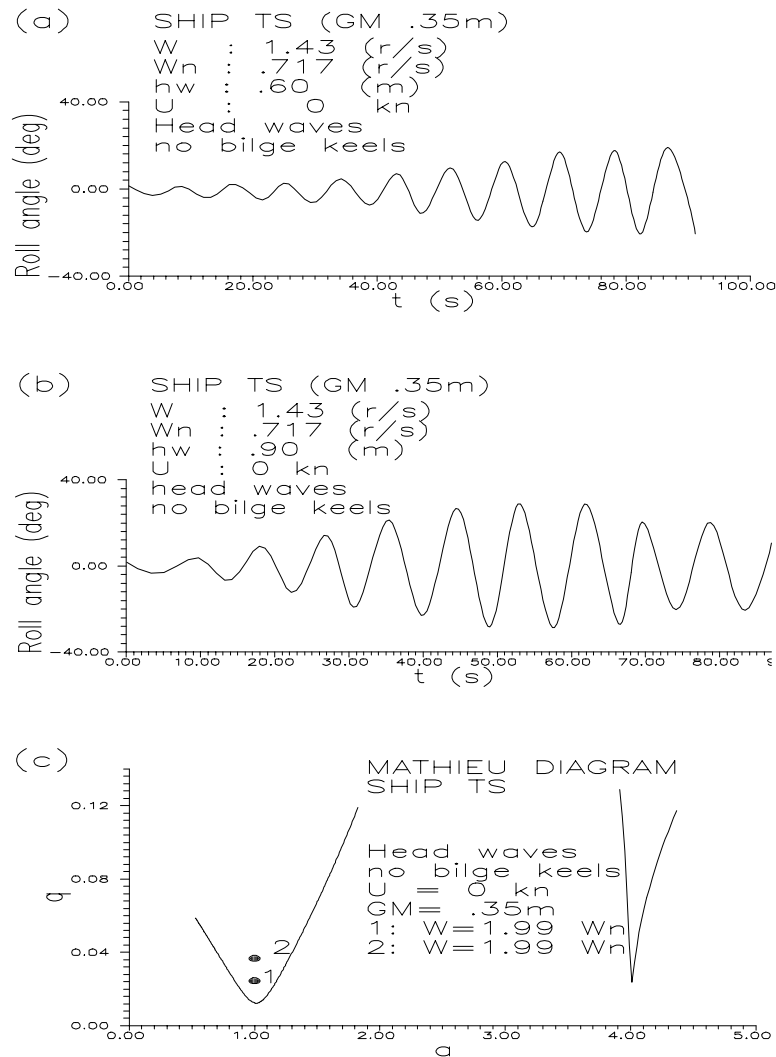


Figura 4 - Casco TS sem bolinas, $\overline{GM} = 0.35m$.

longitudinais permanecem insignificantes. Isso é confirmado na Fig. 3(c), que mostra o ponto 2 bem fora da zona instável do diagrama de Mathieu.

Comparando-se Fig. 3(a) com Fig. 4(b), nota-se que ambos os cascos atingem aproximadamente 30° , mas com o casco TS alcançando isso em 6 ciclos, enquanto que para o casco RS isso requer 9 ciclos. Notar que nessa comparação ambos os cascos estão sem bolinas. A altura metacêntrica para o RS é menor e a altura de onda é muito maior.

Observando-se ponto 1 na Fig. 3(c) e ponto 2 na Fig. 4(c), pode-se notar que ambos estão muito próximos da curva limite. Ponto 2 na Fig. 3(c) está localizado na região estável. A

altura de onda é elevada ($h_w = 2.0m$), mas como mostrado na Fig. 3(b), nenhuma amplificação do movimento de roll ocorre. Comparando-se os pontos 1 e 2 na Fig. 4(c) e suas respectivas séries temporais nas Fig. 4(a,b), nota-se o efeito de aumentar-se a altura de onda para o casco

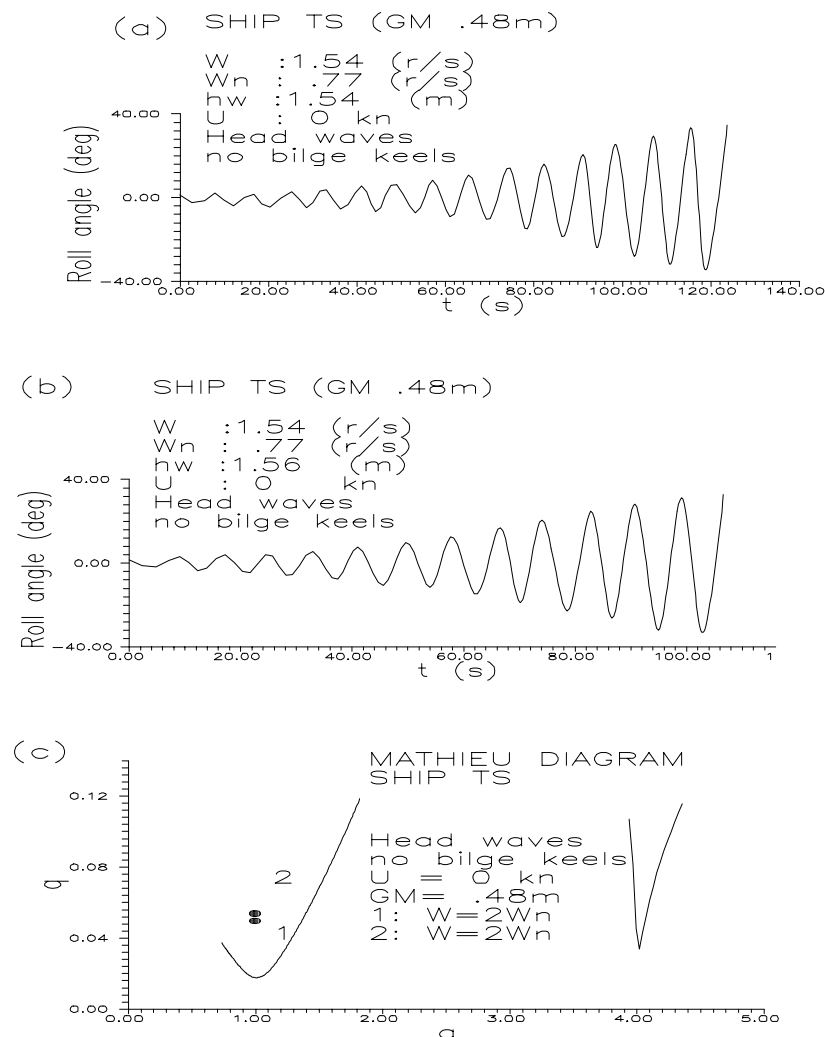


Figura 5 - Casco TS sem bolinas, $\overline{GM} = 0.48m$.

TS sem bolinas. As Fig. 5(a,b) novamente mostram resultados similares para o casco TS para valores fixos de GM e nível de amortecimento. Pequenos aumentos de altura de onda resultam em um correspondente baixo ponto 2, comparado com ponto 1 na Fig. 5(c).

A influência de um maior amortecimento pode ser observado comparando-se Fig. 2(b) com Fig. 4(b). Na Fig. 2(b) o casco TS está dotado de bolinas, $\overline{GM} = 0.32m$ e $h_w = 2.4m$. O ângulo de *roll* alcança aproximadamente 32° em 9 ciclos. Na Fig. 4(b) o mesmo navio, sem bolinas, mas com um maior \overline{GM} e menor altura de onda ($h_w = 0.9m$) alcança 30° em apenas 6 ciclos. A introdução de bolinas contribui para reduzir a distância no diagrama de Mathieu do ponto plotado à curva limite.

Outra comparação interessante é entre a Fig. 4(b) e a Fig. 6(b). Ambas retratam o casco TS sem bolinas, excitado por ondas de alturas equivalentes. Mas a altura metacêntrica nos dois casos é muito diferente. A frequência de onda na Fig. 6(b) é alta ($W=2.08$ rad/s), correspondendo a uma grande excitação paramétrica, mas também a altura metacêntrica é grande ($\overline{GM} = 0.85m$). O movimento instável resultante é mais fraco que aquele dado na Fig.

4(b), e outra visão disso mostra-se na localização do ponto 2 na Fig. 6(c), que é muito próxima do limite estabilidade, se comparado com ponto 2 na Fig. 4(c), localizado bem dentro da região instável. Em decorrência da grande altura metacêntrica considerada na Fig. 6 ($\overline{GM} = 0.85m$), os limites de estabilidade são relativamente altos, especialmente para a zona $W = W_n$, como mostrado na Fig. 6(c). A onda testada na condição da Fig. 6(c) é muito íngreme, ($h_w = \lambda / 14.8$). A onda mais íngreme gerada neste estudo foi aquela cuja altura de onda era dada pela relação $h_w = \lambda / 10.6$.

Claramente, o índice da intensidade da instabilidade paramétrica de um sistema amortecido provido de excitação é a distância do ponto plotado à curva limite de estabilidade

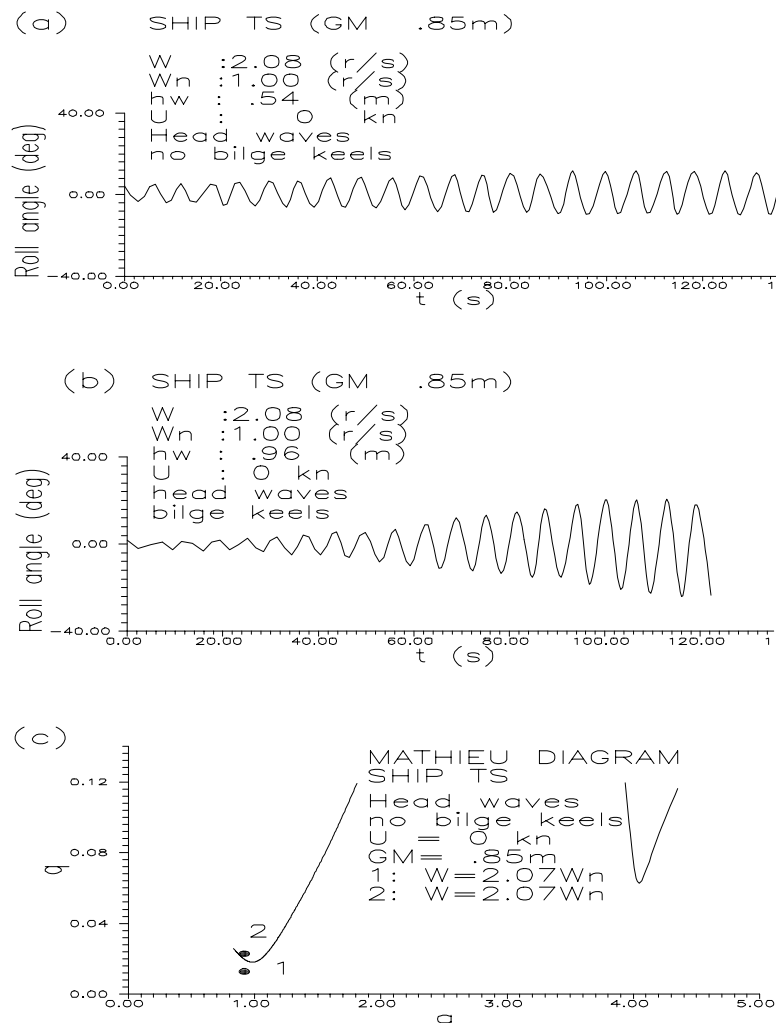


Figura 6 - CascoTS sem bolinas, $\overline{GM} = 0.85m$.

no diagrama de Mathieu amortecido; essa distância define a amplificação do movimento. Isso é também aplicável para os pontos 1 e 2 plotados na Fig. 7(c), representativo dos movimentos mostrados nas Fig. 7(a,b), respectivamente. Essas duas condições têm grandes valores do parâmetro q ($q=0.55$ e $q=0.72$, respectivamente), muito maiores que aqueles apresentados nas Fig. 3(c), 5(c) e 6(c). No entanto, as séries temporais nas Fig. 7(a,b) têm ambas amplificações muito baixas, devido ao fato de que a região instável é estreita na região de sintonia $w = w_n$, e portanto os pontos estão necessariamente próximos dos limites de estabilidade. A onda na Fig. 7(b) é razoavelmente suave ($h_w = \lambda / 26.2$).

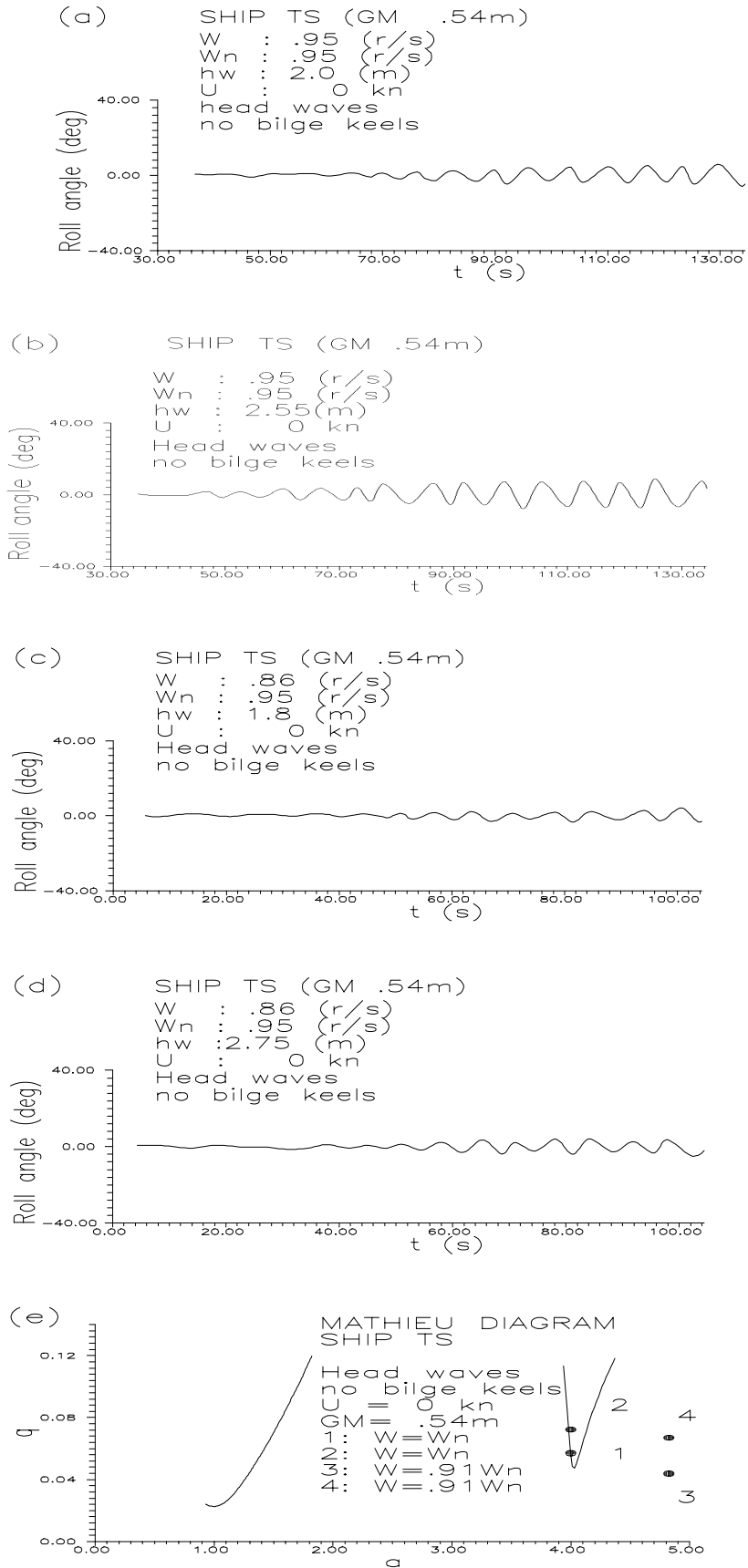


Figura 7 - Casco TS sem bolinas, $\overline{GM} = 0.54m$.

Mas, mesmo para ondas bem íngremes, nenhuma ressonância significativa ocorre na zona $W = W_n$ de instabilidade.

4. CONCLUSÕES

A estabilidade paramétrica de navios em ondas longitudinais foi examinada com comparações entre resultados experimentais e numéricos. A ênfase do estudo reside na tentativa de identificação da influência da forma da pôpa no processo de instabilização.

- Tendo em vista os bons resultados ofertados pelo modelo matemático aqui apresentado de forma resumida, diagramas de Mathieu foram determinados para diferentes condições dinâmicas. Os pontos experimentais foram interpretados à luz de suas posições nesses diagramas. Os ganhos oriundos dessa maneira gráfica de analisar os processos de instabilização foram evidenciados.
- Intensas ressonâncias podem ter lugar quando a sintonia se dá cerca da condição $W = 2W_n$
- Nenhuma ressonância significativa ocorreu na zona $W = W_n$ do diagrama de Mathieu.

Agradecimentos

Ao CNPq e à COPPE/UFRJ, pelo apoio financeiro sem o qual não seria possível a realização deste trabalho. A parte experimental deste trabalho teve o apoio do CONICYT do Chile.

REFERÊNCIAS

- Bloki, W.,1980, *Ship Safety in Connection with Parametric Resonance of the Roll*. International Shipbuilding Progress, No 306.
- Himeno, Y.,1981, *Prediction of Ship Roll Damping - State of Art*. Department of Naval Architecture and Marine Engineering, The University of Michigan. Report No 239.
- Inglis, R. B.; Price, W. G.,1980, *Calculation of the Velocity Potential of a Translating Pulsating Source*. RINA Paper W2.
- Neves, M.A.S.; Pérez, N.A.; Sanguinetti, C.O.F.,1986, *Estabilidad Dinámica de Buques Pesqueros*. Anales, Seminario Nacional de Buques Pesqueros, Maio, Valdivia, Chile.
- Neves, M.A.S.; Pérez, N.A.; Sanguinetti, C.O.F.,1987a, *Estudo Experimental Sobre a Estabilidade em Ondas de Barcos Pesqueiros*. Revista Brasileira de Engenharia-Caderno de Engenharia Naval, SOBENA/CNPq, Junho.
- Neves, M.A.S.; Pérez, N.A.; Sanguinetti, C.O.F.,1987b, *Estabilidad Transversal de Buques Pesqueros en Frecuencias Resonantes*. Proc. X IPEN: Pan - American Congress of Naval Engineering, Rio de Janeiro, Brasil. June.
- Neves, M.A.S.; Pérez, N.A.; Sanguinetti, C.O.F.,1988, *Estudio Analítico-Experimental de la Estabilidad Dinámica de Buques Pesqueros en Olas Regulares*. Ingeniería Naval No. 638-639, Espanha.
- Neves, M.A.S.; Pernambuco, T.A.M.,1991, *Dynamic Stability of Fishing Vessels in Astern Seas*. Proc. XII IPEN: Pan - American Congress of Naval Engineering, Buenos Aires, Argentina.
- Neves, M.A.S.; Salas, M.A.,1992, *Efeitos de Acoplamentos Não-Lineares no Movimento de Jogo de Barcos Pesqueiros*. Anais, (XIV) SOBENA'92, Outubro, Rio de Janeiro, Brasil.

- Neves, M.A.S.; Salas, M.A.,1993, *Límites de Estabilidad de Pesqueros Considerando Acoplamientos No Lineales*. Anales, III Congreso Nacional de Ingeniería Naval y Marítima, Maio, Valdivia, Chile.
- Neves, M.A.S.; Valerio, L.,1994, *Parametric Stability of Fishing Vessels*. Proc. Stability'94, Florida, USA.
- Neves, M.A.S.; Salas, M.A.,1995, *Límites de Estabilidad de Pesqueros Considerando Amortiguamiento Total*. Proc. XIV IPEN: Pan - American Congress of Naval Engineering, Lima, Peru. June.
- Neves, M.A.S.; Valerio, L.,1995, *Transom Stern VS Round Stern : Comparison of Stability in Waves of Two Small Fishing Vessels*. Proc. XIV IPEN: Pan - American Congress of Naval Engineering, Lima, Peru. June.
- Neves, M.A.S.; Pérez, N.A.; Valerio, L.,1998, *Stability of Small Fishing Vessels in Longitudinal Waves* . Ocean Engineering, Vol. 26 N. 12.
- Pérez, N.; Sanguinetti, C.F.O.,1995, *Experimental Results of Parametric Resonance Phenomenon of Roll Motion in Longitudinal Waves for Small Fishing Vessels*. International Shipbuilding Progress, Vol. 42, No. 431, Sept.
- Skomedal, N. G.,1982, *Parametric Excitation of Roll Motion and its Influence on Stability*. Proceedings, Second International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, Tokyo, Oct.
- Valerio, L.,1994. *Estabilidade Paramétrica de Navios em Ondas Longitudinais Regulares*, Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ

LIMITS OF STABILITY FOR SHIPS IN WAVES

Abstract. Stability of ships in waves is investigated, considering the effect of non-linear couplings in the assessment of restoring and wave forces and moments. It is shown that instabilities induced by these non-linear couplings do exist and that they may be relevant, despite the fact that the second order forces inducing these instabilities are small. Stability maps are obtained thus separating regions of stability for the ship in waves

Key words: Dynamic Stability, Stability Maps, Fishing Vessels